

سیستم انبارداری معکوس اتوماتیک: مفاهیم بنیادی، مدل سازی و حل مسئله چینش بهینه اقلام و مسیریابی ربات ها

انسیه نیشابوری جامی^۱، الیس مسیحی^{۲*}

۱. دانشجوی دکتری مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس

۲. استادیار گروه مهندسی صنایع، دانشگاه تربیت مدرس

(تاریخ دریافت: ۹۴/۱۱/۱۴، تاریخ دریافت روایت اصلاح شده: ۹۵/۰۹/۲۲، تاریخ تصویب: ۹۵/۱۰/۰۴)

چکیده

انبارها و مراکز توزیع، یکی از اجزای مهم در زنجیره تأمین هستند که مدیریت آن ها از اهمیت ویژه ای برخوردار است. رویکرد غالب و معمول جمع آوری کالا در انبارها بدین صورت است که اپراتور به صورت پیاده یا با خودرو، اقلام سفارش داده شده را جمع آوری می کند. از سال ۲۰۰۶ به بعد، در برخی از انبارهای بزرگ مانند شرکت آمازون - که نقش توزیع کننده را دارند - از سیستم جدیدی بهره گرفته شده است که در آن، چندین ربات سیار به زیر قفسه های حامل اقلام می روند و آن ها را به سمت اپراتور حرکت می دهند. اپراتور نیز اقلام مورد نیاز را از قفسه ها برمی دارد و سفارش را تکمیل می کند. مزایای این سیستم در مقایسه با روش سنتی، افزایش انعطاف پذیری، دقت و سرعت آماده سازی سفارش هاست. از طرفی، این سیستم - که ما آن را «سیستم انبارداری معکوس اتوماتیک (ساما)» می نامیم - به عنوان راه حلی تجاری معرفی شده و تا به حال، مستنداتی پژوهشی درمورد آن منتشر نشده است. در این مقاله، سیستم مذکور از دیدگاه مهندسی صنایع مطالعه می شود. سپس اجزای آن و ارتباط آن ها با یکدیگر تبیین و معرفی می شود و دو زیرمسئله اصلی آن شامل مسائل تخصیص و مسیریابی مطالعه می شوند. در ادامه، مدل سازی ریاضی مسائل چینش بهینه اقلام درون قفسه ها، با هدف مینیمم کردن هزینه و همچنین یافتن بهترین مسیر برای حرکت قفسه ها ارائه می شود. در انتها نیز نتایج حل مسئله با الگوریتم ژنتیک و ماکزیمم جریان ارائه شده است.

واژه های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، الگوریتم شبیه سازی تبرید، دوسطحی، گذاشت و برداشت هم زمان، مسئله

مکان یابی - مسیریابی.

مقدمه و معرفی سیستم انبارداری معکوس اتوماتیک (ساما)

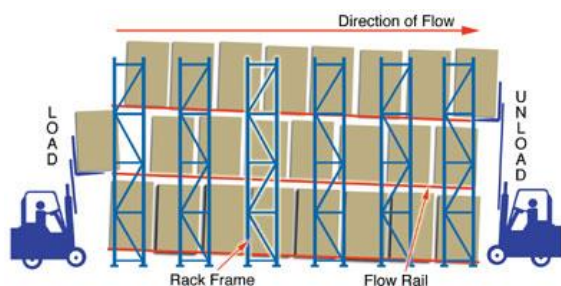
انبارها اجزایی مهم و اساسی در زنجیره تأمین هستند و به دلیل اهمیتشان، روش های مختلفی برای طراحی و مدیریت آن ها ارائه شده است. در حال حاضر، انبارداری به شیوه های مختلفی صورت می گیرد که عمده آن به صورت دستی است و بخشی اندک نیز با بهره گیری از فناوری های روز مانند سیستم تشخیص فرکانس رادیویی و ربات ها و ماشین های پیشرفته صورت می گیرد. بهره گیری از سیستم هایی مانند ذخیره و بازیابی اتوماتیک^۱ و سیستم تشخیص فرکانس رادیویی^۲، بهبود وضعیت در انبارها و کاهش هزینه ها و افزایش کارایی سیستم را به دنبال داشته است.

در سال ۲۰۰۶ سیستم نوینی به نام Kiva در صنعت انبارداری شرکت Amazon به کار گرفته شد که در آن

برخلاف روش های موجود، به جای اینکه اپراتورها یا تجهیزات به سراغ قفسه های حاوی اقلام بروند و اقلام مورد نیاز را جمع آوری کنند، به کمک اپراتورها یا ماشین آلات (ربات های متحرک) به سمت ایستگاه های جمع آوری اقلام و تکمیل سفارش حرکت می کنند و پس از برداشت اقلام مورد نیاز، به مکان قبلی خود بازمی گردند. همچنین در این سیستم، برای چیدن اقلام درون قفسه ها نیز برخلاف روش های موجود - که اپراتور یا ماشین آلات وظیفه چیدن اقلام را به عهده دارند - قفسه ها به سمت اپراتورها حرکت می کنند و پس از چیدن، به مکان اولیه بازمی گردند.

متأسفانه جزئیات و مستندات سیستم انبارداری فوق در اختیار جامعه علمی دنیا قرار داده نشد و در حال حاضر، به صورت یک راه حل صنعتی با نام تجاری Kiva Systems یا Amazon Systems به متقاضیان عرضه می شود [۱].

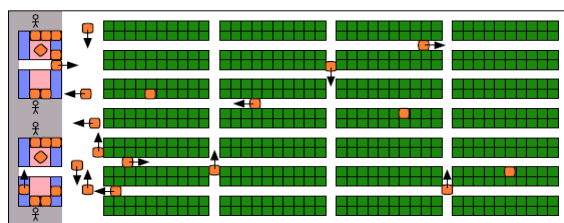
سیستم جریان پالت- راک شرکت سیسکو، پالت‌ها به وسیله لیفتراک‌ها در قفسه‌هایی با شیب ملایم گذاشته و از طرف دیگر برداشته می‌شوند (شکل ۱) و حرکت پالت‌ها فقط در درون قفسه (راک) انجام می‌گیرد، اما در ساما، قفسه‌های حامل اقلام به وسیله ربات‌ها در فضای انبار حرکت می‌کنند و اقلام درون آن‌ها به وسیله اپراتور برداشته یا چیده می‌شود.



شکل ۱. سیستم جریان پالت- راک شرکت سیسکو

شایان ذکر است تابع هدف در بیشتر سیستم‌های انبارداری، مینیمم کردن هزینه است که در ساما نیز این هدف رعایت شده است.

در شکل ۲ نمای کلی قفسه‌ها، مکان‌های چیدن سفارش و ربات‌های در حال حرکت در راهروهای یک سیستم انبارداری معکوس مشاهده می‌شود. در این شکل، ربات‌های متحرک کوچک و ساده‌ای، قفسه‌های حامل اقلام را به سوی ایستگاه‌هایی که اپراتورها قرار گرفته‌اند (سمت چپ شکل)، هدایت می‌کنند.



شکل ۲. نمونه‌ای از مکان‌یابی سیستم انبارداری معکوس اتوماتیک [۱]

۱. زیرمسائل اصلی در ساما

در سیستم انبارداری معکوس، سه بخش اصلی وجود دارد: ۱. بخش دریافت اقلام، ۲. انبار اصلی و ۳. بخش ارسال سفارش‌ها. در بخش دریافت اقلام، تعدادی اپراتور وجود دارند که اقلام رسیده به انبار را در قفسه‌ها قرار می‌دهند.

مقاله حاضر، اولین تلاش برای واکاوی اصول ریاضی این نوع انبارداری است که از این پس با نام «سیستم انبارداری معکوس اتوماتیک (ساما)» معرفی می‌کنیم و به تشریح اجزا و زیرمسائل آن می‌پردازیم.

سیستم انبارداری معکوس اتوماتیک، مزیت‌هایی نسبت به روش‌های موجود دارد. یکی از این مزیت‌ها، حذف کردن راه رفتن اپراتورها در انبارهای سنتی است که با حذف آن، سیستم دو تا سه برابر مؤثرتر می‌شود. همچنین با حرکت موجودی‌ها به سمت اپراتور و قرار گرفتن او در جای مشخص، کارایی وی تا دو برابر افزایش می‌یابد. از دیگر مزایای این روش، کاهش خطا در جمع‌آوری سفارش‌هاست که مطابق گزارش‌ها، دقت را در انبارهای مورد استفاده تا ۹۹ درصد افزایش داده است. از دیگر مزایای این روش (حتی در مقایسه با روش‌های اتوماتیک موجود) انعطاف‌پذیری و امکان بسط و توسعه بالای آن است. بدین معنا که روش‌های موجود، بعد از نصب و پیاده‌سازی به سختی قابل گسترش و جابه‌جایی هستند، اما سیستم انبارداری معکوس، این مشکلات را برطرف ساخته است [۱]. در سیستم انبارداری معکوس اتوماتیک، تعیین تعداد بهینه قفسه‌ها، اپراتورها و ربات‌هایی که قفسه‌ها را حمل می‌کنند، امری ضروری است. برای بهینه‌سازی چنین سیستمی، زمان‌های بیکاری اپراتورها باید کمینه شود و میزان تجهیزات مورد نیاز به‌ویژه قفسه‌ها و ربات‌ها مینیمم شود.

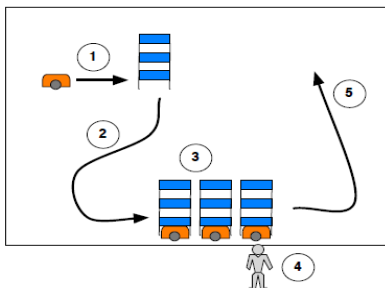
از تفاوت‌های اصلی ساما با سیستم‌های رایج مانند نوار نقاله‌ها، AGV و پالت- راک‌ها می‌توان به موارد زیر اشاره کرد:

۱. در همه سیستم‌های موجود، قفسه‌ها در مکان ثابت قرار دارند، اما در ساما، قفسه‌ها در حال حرکت‌اند و پس از حرکت، در بهترین مکان قرار می‌گیرند؛

۲. در سیستم‌های کنونی ذخیره‌سازی، یک قلم کالای خاص به صورت متمرکز در یک یا چند جای مشخص چیده می‌شود^۳، اما در ساما، یک قلم کالای خاص را براساس سازگاری بین اقلام می‌توان در چند قفسه مختلف قرار داد؛ ۳. در سیستم‌های اتوماتیک انبارداری، AGV‌ها یا ربات‌ها، اقلام مورد نیاز را از قفسه‌ها برمی‌دارند یا درون آن‌ها قرار می‌دهند و در انبار حرکت می‌کنند. همچنین در

۵. برگشت قفسه به ناحیه ذخیره سازی (بخش اصلی انبار).

در شکل ۴، این وظایف مشاهده می شود.



شکل ۴. فعالیت ربات‌ها در سیستم انبارداری معکوس اتوماتیک [۱]

(۳) زیرمسئله صف، به این دلیل بررسی می شود که با تعیین تعداد بهینه اپراتورها و همچنین تخصیص سفارش به آن‌ها، زمان انتظار در صف و همچنین زمان تکمیل سفارش مینیمم شود.

(۴) زیرمسئله موجودی، تعیین مقدار و زمان مناسب سفارش اقلام است؛ به طوری که با کمبود موجودی مواجه نشویم.

وظایف و کارهایی را که در انبارها انجام می شود، می توان از نظر ورود و خروج اقلام به انبار به دو دسته کلی تقسیم کرد: بخشی از فعالیت‌ها مربوط به دریافت اقلام درون انبار و چیدن و ذخیره سازی آن‌ها و بخش دیگر مربوط به دریافت سفارش‌ها، تکمیل آن‌ها و ارسال برای مشتریان است. در ادامه، مسائل موجود در این دو حیطه مطرح شده است. در زمان‌های مشخصی، موجودی اقلام قفسه‌ها چک می شود و در صورتی که نیاز باشد، به تعداد مورد نظر در قفسه‌های منتخب چیده و در صورت نیاز سفارش داده می شود.

زیرمسائل مهم در این بخش عبارت‌اند از:

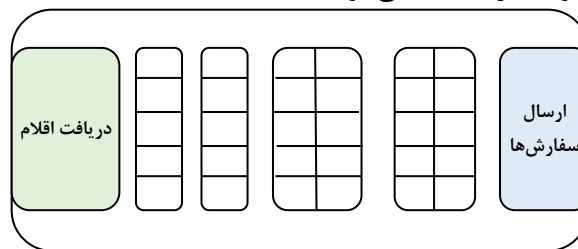
الف) انتخاب قفسه‌های مناسب برای چیدن هر قلم کالا (مسئله تخصیص)؛

ب) تخصیص نزدیک‌ترین ربات به قفسه مذکور و تعیین مسیر حرکت ربات تا رسیدن به قفسه مذکور (مسئله تخصیص و مسیریابی)؛

ج) انتخاب ایستگاه مورد نظر برای چیدن هر قلم کالا؛

د) تعداد هر قلم کالا برای چیدن در هر قفسه انتخاب شده؛

در انبار اصلی، قفسه‌های حاوی اقلام قرار گرفته‌اند. در بخش ارسال سفارش‌ها نیز چند اپراتور سفارش‌ها را تکمیل و برای مشتریان ارسال می کنند. در شکل ۳ طرحی از یک نمونه انبار مشاهده می شود.



شکل ۳. انبار با بخش دریافت اقلام، انبار اصلی و ارسال سفارش‌ها

ساما را می توان از دیدگاه‌های مختلف بررسی کرد. از دیدگاه هوش مصنوعی، همکاری ربات‌ها در این سیستم، به صورت چندرباتی^۴ است و به دلیل شناخته شده بودن محیط و کنترل آن، طراحی همکاری آن‌ها ساده است [۱]. در این سیستم، هیچ رباتی در انجام دادن کارها به ربات‌های دیگر وابسته نیست. از طرفی همه آن‌ها در تکمیل سفارش مشتری دخالت دارند [۲].

از دیدگاه مهندسی صنایع، طراحی ساما نیازمند بررسی چهار زیرمسئله اصلی زیر است:

(۱) زیرمسئله تخصیص، شامل چهار مسئله تخصیص اقلام وارد شده به قفسه‌های منتخب، تخصیص قفسه‌ها به مکان‌های مناسب، تخصیص سفارش‌ها به اپراتورها و تخصیص ربات‌ها به قفسه‌ها برای حمل است.

(۲) زیرمسئله مسیریابی، یافتن مسیر حرکت قفسه‌ها (ربات‌ها) است؛ به گونه‌ای که ربات‌ها کوتاه‌ترین مسیر را طی کنند و تداخلی نیز بین آن‌ها اتفاق نیفتد. ربات‌ها پنج وظیفه اصلی را در انبار برعهده دارند که به شرح زیر است:

۱. حرکت ربات از مکان فعلی خود به سمت مکان فعلی قفسه؛

۲. حرکت دادن قفسه از مکان فعلی به سمت ایستگاه چیدن اقلام یا تکمیل سفارش‌ها؛

۳. ایستادن در صف تا زمانی که نوبت قفسه شود؛

۴. چیدن اقلام روی قفسه یا برداشت موجودی از قفسه توسط اپراتور؛

کالا ممکن است در بیش از یک قفسه چیده شده باشد، برای انتخاب قفسه مناسب و تخصیص یک سفارش به یک ایستگاه باید به تشابه اقلام درون سفارش‌های تخصیص‌یافته به یک ایستگاه و اپراتور، مدت انتظار هر سفارش در هر ایستگاه، زمان رسیدن آخرین قفسه و محل بازگشت قفسه‌ها توجه کرد.

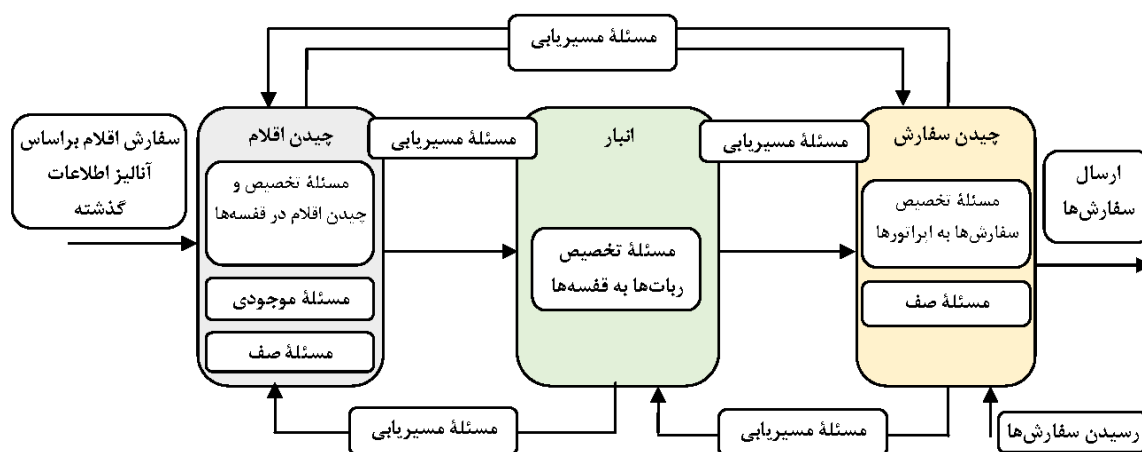
این مراحل به‌طور کامل با هم در ارتباطند؛ به‌طوری‌که بر یکدیگر تأثیر متقابل دارند؛ بنابراین، در کل روز، داده‌ها باید در یک سیستم یکپارچه تجزیه و تحلیل شوند. این مسائل در سه بخش اصلی انبار به‌صورت شماتیک در شکل ۵ نشان داده شده‌اند.

در بحث انبارداری، چندین پارامتر مهم مانند ذخیره‌سازی، دسته‌بندی، مسیریابی، اتوماتیک‌بودن سیستم و... بیان می‌شود که بر هزینه‌های سیستم تأثیرگذارند. در پژوهش‌های موجود در این زمینه، اغلب یک یا دو پارامتر بررسی شده است [۳]. در ادامه، با توجه به اهمیت دو موضوع ذخیره‌سازی و مسیریابی، این دو موضوع بررسی شده و مدل ریاضی متناسب با ساختار سیستم انبارداری معکوس برای این دو مسئله بیان شده است.

ه) محل بازگشت هر قفسه با هدف مینیمم فاصله و حمل‌ونقل‌های آتی (مسئله مسیریابی).

پس از رسیدن سفارش‌ها به انبار برای چیدن به اپراتورها تخصیص داده می‌شود که این تخصیص براساس چند معیار انجام می‌گیرد:

۱. تخصیص سفارش‌ها به ایستگاه‌ها براساس مدت انتظار و تشابه اقلام موجود در سفارش‌ها (مسئله صف و مسئله تخصیص)؛
 ۲. فراخوانی قفسه‌های مورد نیاز به‌وسیله ایستگاه‌ها؛
 ۳. تخصیص ربات‌ها به قفسه‌های مورد نظر (مسئله تخصیص)؛
 ۴. حرکت قفسه‌ها به سمت ایستگاه‌های مورد نظر (مسئله مسیریابی)؛
 ۵. تکمیل سفارش‌ها؛
 ۶. بازگشت قفسه‌ها به جای مناسب (مسئله مسیریابی)؛
 ۷. ارسال سفارش‌ها به بخش بسته‌بندی؛
 ۸. ارسال اطلاعات به بخش‌های دیگر برای به‌روزکردن داده‌ها و اتخاذ تصمیم‌های صحیح.
- با توجه به مطالب بالا می‌توان گفت از آنجاکه هر قلم



شکل ۵. زیرمسائل مطرح در سیستم انبارداری معکوس اتوماتیک (ساما)

بنابراین، کمینه‌کردن زمان چیدن، اهمیتی حیاتی در کنترل فرایند چیدن دارد. برای چیدن یک سفارش خاص، زمان چیدن سفارش برابر زمان یک تور است که در این تور، اقلام مورد نیاز برداشته و سفارش تکمیل می‌شود. این

بهینه‌سازی سیستم انبارداری معکوس اتوماتیک

از آنجاکه زمان چیدن، بخش جدایی‌ناپذیر زمان تحویل است، کاهش زمان چیدن ممکن است بلافاصله در بهبود خدمات ارائه‌شده به مشتریان نیز تأثیرگذار باشد [۴]؛

ادامه ارائه شده است، فرض می‌شود که قفسه‌ها به سمت ایستگاه‌های چیدن حرکت می‌کنند. از طرفی از اطلاعات گذشته برای محاسبه سازگاری بین اقلام استفاده می‌شود.

۳. مسئله مسیریابی

یکی از مسائل مهم دیگر در انبارداری معکوس که در مدلسازی مسئله هم مدنظر است، مسیریابی است. این مسئله در مقالات مختلفی که در حیطه مسیریابی چیننده در انبار هستند، بررسی شده است. در ادامه، مسائل و مقالات مطرح در این زمینه معرفی می‌شوند.

مسئله فروشنده دوره‌گرد، مشهورترین نوع مسئله مسیریابی وسیله نقلیه است. در TSP هدف، یافتن کوتاه‌ترین مسیر برای ویزیت مجموعه شهرها، فروش اجناس و بازگشت به خانه است. TSP جزء مسائل NP-hard است و راه‌حل‌های تقریبی برای حل این مسئله وجود دارد. multi-TSP همان مسئله فروشنده دوره‌گرد با چند فروشنده است. این مسئله، با روش‌های برنامه‌ریزی عدد صحیح و دیگر روش‌های هیوریستیک قابل حل است [۱۰].

تیز و همکاران [۱۱] مسئله مسیریابی چیدن چند راهرو موازی را بررسی کردند و از آنجاکه مسئله فروشنده دوره‌گرد، NP-hard به‌شمار می‌رود و تا سه راهرو موازی، با الگوریتم‌های دقیق قابل حل است، آن‌ها از هیوریستیک Lin-Kernighan-Helsgaun برای حل بهره گرفتند. مطابق نتایج، استفاده از این الگوریتم سبب کاهش ۴۷ درصد مسیر است. نوروزی و همکاران [۱۲] مدل ریاضی مسیریابی و مکان‌یابی را در زنجیره تأمین ارائه دادند و با الگوریتم رقابت استعماری حل کردند.

مسئله مسیریابی وسیله نقلیه با حمل در بازگشت^۸ با حمل و نقل اقلام ارتباط دارد و سریع‌تر از ویزیت کردن مکان‌ها به شکل معمولی است. در این مسئله، اقلام به وسیله وسایط نقلیه از دپو یا دپوهای مرکزی به مشتریان تحویل داده می‌شوند. وسایط نقلیه قابلیت آن را دارند که فقط یک سفارش یا ترکیبی از چند سفارش را برداشت کنند و تحویل دهند. در مسئله VRPB ممکن است برخی محدودیت‌ها مانند ظرفیت، پنجره زمانی و چند دپو وجود داشته باشد. این مسائل، با روش‌های هیوریستیک و متاهیوریستیک قابل حل است [۱۳]. پاندلیس و همکاران [۱۴] مسئله یافتن مسیر بهینه یک وسیله نقلیه با شروع از یک دپو و چیدن k محصول برای N مشتری مطابق با

زمان شامل زمان سفر، زمان جست‌وجو، زمان برداشتن قطعه و زمان برپایی^۵ است. در ساما، زمان سفر مدتی است که طول می‌کشد تا قفسه‌ها به اپراتورها برسند و یک سفارش تکمیل شود. در این سیستم انبارداری، زمان جست‌وجو در عمل ناچیز است، زیرا خود اقلام به سمت اپراتور می‌آیند و بقیه زمان‌ها نیز مشابه سیستم‌های دیگر انبارداری است؛ بنابراین، برای بهینه‌کردن ساما باید تمرکز خود را بر زمان سفر قرار دهیم. دو عامل مهم در این زمان، نحوه ذخیره‌سازی اقلام در قفسه‌ها و مسیر حرکت ربات‌هاست که در ادامه به این دو موضوع پرداخته شده است.

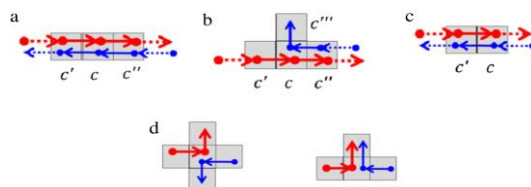
۲. مسئله چیدن بهینه اقلام درون قفسه‌ها

همان‌طور که ذکر شد، تخصیص اقلام به قفسه‌ها، یکی از مسائل مطرح در سیستم انبارداری معکوس اتوماتیک است که در صورت بهینه‌کردن آن می‌توان سیستم و هزینه‌های آن را بهبود بخشید.

مسئله واگذاری مکان انبار^۶ نسخه عمومی‌تر مسئله تخصیص محصولات^۷ است که شامل تخصیص محصولات به قفسه‌های مختلف در انبار است و اغلب هدف آن مینیمم کردن هزینه‌های حمل و نقل و ماکزیمم کردن کاربری فضا است. فرموله کردن این مسئله و حل آن نیاز به اطلاعات ورودی دارد که عبارت‌اند از: تعداد، دسترسی، ابعاد و مکان قفسه‌ها، میزان تقاضا، کمیت هر محصول و... [۵].

در این حوزه، پژوهش‌هایی با راه‌حل‌های متفاوت انجام گرفته است که می‌توان به چند مورد از آن‌ها اشاره کرد: موپانی و آدیل [۶]، مدلی را برای تخصیص محصولات دسته‌بندی شده به قفسه‌ها طراحی کردند. هیراگو [۷] مدل ریاضی را برای تخصیص اقلام به نواحی انبار ارائه داد و آن را با هیوریستیک سه مرحله‌ای حل کرد. اونوت و همکاران [۸] یک مدل ریاضی را برای حل مسئله PAP در انبارهای چندلایه‌ای معرفی کردند. صانعی و همکاران [۹] یک مدل ریاضی خطی را برای مسئله PAP با هدف بهینه‌سازی مدیریت موجودی و به‌کارگیری تجهیزات ارائه دادند. گریرو و همکاران [۵] مقاله [۹] را گسترش دادند و فرض کردند که قفسه‌ها چندطبقه‌اند. در همه مقالاتی که به آن‌ها اشاره شد و پژوهش‌های دیگری که در این حیطه انجام گرفته‌اند، همواره این فرض برقرار بوده است که اپراتورها وظیفه دریافت اقلام را برعهده دارند، اما در مدلی که در

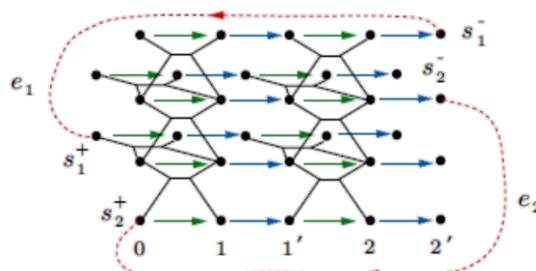
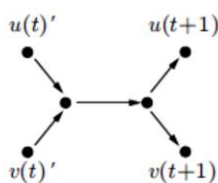
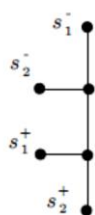
منظم و از روی مسیرهای مشخص ارائه دادند. هدف مقاله، مینیمم کردن ماکزیمم طول مسیر است. به عبارت دیگر، زمان حرکت آخرین ربات برای رسیدن به هدف را مینیمم می کنند. برای حل مسئله، صفحه مشبک را به صورت گراف در نظر گرفته اند که گره ها سلول های خالی و بردارها ارتباط میان خانه ها را نشان می دهد. با تعریف چهار نوع برخورد میان ربات ها که در شکل ۶ است، تقدم و تأخر بین دو ربات را در خانه های دارای برخورد تعیین می کنند و مسئله را حل می کنند.



شکل ۶. انواع برخورد بین دو ربات [۱۶]

هر لحظه با در دست داشتن مکان و جهت حرکت هر ربات و با توجه به عدم برخورد بین ربات ها، مسیر بهینه را تعیین می نماید؛ بنابراین، این روش بیشتر بر مبنای داده های هندسی و میانی ریاضی است.

یو و لاوال [۱۸] روشی را مبتنی بر تئوری شبکه ها ارائه دادند که قابلیت آن را دارد که بدون هیچ محدودیتی، مسیر حرکت ربات های زیادی را تعیین کند. مسئله مسیریابی، چند ربات را منطبق بر یک مسئله ماکزیمم جریان کرده است؛ به این ترتیب که معادل هر بردار در شبکه اصلی، بردارهایی را به شبکه می افزاید که هزینه بردارهای افقی یک و بقیه بردارها صفر است و با جست و جوی این شبکه، مسئله را حل می کند. در شکل ۷، یک نمونه از گسترش شبکه اولیه و یک نمونه مسئله حل شده به وسیله این روش ارائه شده است.



شکل ۷. شبکه اولیه و شبکه گسترده [۱۸]

ترتیب مشتریان را بررسی کردند. وسیله نقلیه اجازه دارد که در حین سفر به دپو برگردد و محصولات جدید را بردارد. محصولات، اندازه یکسان دارند. ستاک و همکاران، مسئله مسیریابی وسیله نقلیه چندانباری ظرفیت دار را با در نظر گرفتن مسیر بین انبارها در نظر گرفتند و حل کردند [۱۵].

در انبارداری معکوس، ربات ها و قفسه ها در مسیرهای مشخصی حرکت می کنند؛ بنابراین، از روش هایی که ارائه شد، نمی توان برای حل مسئله استفاده کرد. بدین ترتیب، روش هایی مطرح می شود که برای مسیریابی در مسیرهای مشخص از آن ها استفاده می شود. داوودی و همکاران [۱۶] روشی برای حرکت دو ربات روی صفحه با تقسیم بندی

این روش، برای دو ربات در زمان $O(n)$ قابل حل است و برای بیش از دو ربات قابل استفاده نیست. یکی از اهداف این پژوهش، گسترش مسئله برای سه ربات است، اما از آنجاکه در مسئله مورد بررسی، تعداد زیادی ربات وجود دارد، این روش، کارایی زیادی برای حل مسئله نخواهد داشت.

روزبهرانی و دآندره آ [۱۷] الگوریتمی برای برنامه ریزی مسیر روی شبکه مشبک ارائه دادند. در این تحقیق، فضا به شکل مشبک تقسیم بندی شده است و تسهیلات زیادی برای حرکت روی مسیرها برای انجام دادن کارهای مشخص وجود دارد. هریک از تسهیلات برای انجام دادن کار مورد نظر باید از روی مکان های مشخصی عبور کند که این اطلاعات هر لحظه به روز می شوند. هدف این پژوهش، یافتن مجموعه مسیرهایی است که سرعت متوسط تسهیلات را با در نظر گرفتن امنیت ماکزیمم کنند. جهت حل مسئله، در

مدل سازی مسئله

در این بخش، مسئله مسیریابی ربات ها و همچنین ذخیره سازی اقلام قفسه ها در سیستم انبارداری معکوس، به نحوی که هزینه ها مینیمم شوند، فرموله شده است. در ادامه، مفروضاتی برای ساده سازی مدل و تصمیم هایی که باید اتخاذ شود، ارائه شده است.

مفروضات

۱. تقاضای مشتریان غیرقطعی است و از توزیع نرمال پیروی می کند و تقاضای آن ها مستقل از هم است؛
۲. با توجه به تقاضای مشتریان، میزان دریافت هر قلم کالا در بازه های زمانی معین مشخص است؛
۳. تعداد اقلام و همچنین تعداد قفسه ها ثابت و مشخص است؛
۴. تعداد ربات ها را می توان در مراحل حل مشخص کرد، اما برای ساده سازی مسئله فرض می شود که مقدار آن معین است؛
۵. ربات ها فقط در مسیرهای ثابت و مشخص حرکت می کنند؛
۶. میزان کالای موجود در انبار در هر زمان، از مجموع قفسه های انبار، کمتر یا مساوی است؛
۷. جای قفسه ها ثابت است و در زمان های مختلف، با توجه به اقلامی که روی آن چیده شده است، تغییر نمی کند؛
۸. زمان، گسسته فرض شده است.

تصمیم ها

۱. تصمیم گیری درمورد تخصیص اقلام به قفسه ها: یکی از تصمیم های مهمی که باید در هر زمان اتخاذ شود، این است که هر قلم کالا به کدام قفسه و به چه تعدادی تخصیص یابد و در آن چیده شود.
۲. تصمیم گیری درباره تخصیص ربات ها به قفسه ها: زمانی که یک قلم کالا یا یک سفارش می رسد، نیاز است که قفسه (قفسه های) مورد نظر به سمت ایستگاه دریافت اقلام یا ارسال سفارش حرکت کنند که در اینجا، مسئله مورد نظر تخصیص نزدیک ترین ربات به قفسه مورد نظر است.
۳. تصمیم گیری درمورد مسیر حرکت ربات ها: بعد از تخصیص ربات مورد نظر به قفسه مربوط، دو مسئله مطرح است. اولی مسیر حرکت ربات تا رسیدن به قفسه مورد نظر و دومی مسیر حرکت ربات با قفسه تا رسیدن به ایستگاه مورد نظر است؛ به طوری که ربات ها کوتاه ترین مسیر را طی کنند و تداخل بین آن ها صورت نگیرد.

۴. تصمیم گیری درمورد تعداد بهینه ربات ها: یکی از

مسائل مهم با توجه به هزینه ها، تعیین تعداد بهینه ربات ها است. برای رسیدن به این هدف، در بخش نتایج محاسباتی برای هریک از مسائل با توجه به هزینه ها، تعداد بهینه ربات ها مشخص شده است. مجموعه اندیس ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم به شرح جدول ۱ هستند. تابع هدف و محدودیت های مسئله به شرح زیرند:

$$\min z = z_1 + z_2$$

Subject to:

$$z_1 = 2e_1 \sum_k \sum_s \sum_l \sum_i \sum_t d_{stk} \cdot x_{islt} + 2e_1 \sum_k \sum_s \sum_l \sum_i \sum_t d'_{stk} \cdot x'_{islt} + p_2 \sum_s \sum_i \sum_j \sum_t v_{ijst} - p_1 \sum_s \sum_i \sum_j \sum_t z_{ijst}$$

$$z_2 = 2e_2 \left(\sum_{r=1}^R \sum_{d \in S(r)} \sum_{s=1}^{m_w} \sum_{t=1}^T y_{rst} (|x_{st} - x_{rt}| + |y_{st} - y_{rt}|) + R \cdot CR \right) \quad (1)$$

$$\sum_i q_{it} \leq mwh, \quad \forall t \quad (2)$$

$$o_{iT} \leq \sum_{t < T} f_{it} - \sum_{t \leq T} o_{it}, \quad \forall t \quad (3)$$

$$\sum_s \sum_l y_{islt} = f_{it}, \quad \forall i, t \quad (4)$$

$$x_{islt} \cdot x_{jsht} = z_{ijst}, \quad \forall i, j \in T_1, h \neq l \quad (5)$$

$$x_{islt} \cdot x_{jsht} = 0, \quad \forall i, j, \forall s, l = h \quad (6)$$

$$\sum_s z_{ijst} \geq 1, \quad \forall t, \forall i, j = 1, \dots, n \in T_1 \quad (7)$$

$$x_{islt} \cdot x_{isht} = 1 - U_{ijst}, \quad \forall i, j \in T_2 \quad (8)$$

$$U_{ijst} = 0, \quad \forall i, j \notin T_2 \quad (9)$$

$$x_{islt} \cdot x_{iuht} = v_{ijst}, \quad \forall i, j \in T_1, s \neq u \quad (10)$$

$$v_{ijst} = 0, \quad \forall i, j \notin T_1 \quad (11)$$

$$b_{ist} + b_{jst} \leq 1 + c_{ij} \quad \forall i = 1, \dots, n-1, \forall j = i+1, \dots, n \quad (12)$$

$$\sum_s \sum_l y'_{islt} = o_{iT}, \quad \forall i = 1, \dots, n, \forall t = 1, \dots, T \quad (13)$$

$$y_{islt} \leq M \cdot x_{islt}, \quad \forall i = 1, \dots, n, \forall s = 1, \dots, S, \quad \forall l = 1, \dots, h, \forall t \quad (14)$$

$$y'_{islt} \leq M \cdot x'_{islt}, \quad \forall i = 1, \dots, n, \forall s = 1, \dots, S, \quad \forall l = 1, \dots, h, \forall t$$

نشان می‌دهد تعداد همه اقلام وارد شده در هر زمان، با مجموع تعداد اقلامی که در هر طبقه در آن زمان چیده می‌شود، برابر است. محدودیت (۴) نشان می‌دهد در صورتی که زوج اقلام موجود در T_1 در یک قفسه قرار داشته باشند، مقدار Z_{ijst} برابر یک می‌شود. محدودیت (۵) نشان می‌دهد دو قلم کالا نباید در یک طبقه در کنار هم قرار بگیرند. محدودیت (۶) تضمین می‌کند که در هر لحظه، هر زوج قلم موجود در مجموعه T_1 حداقل در یک قفسه قرار گرفته‌اند.

محدودیت (۷) نشان می‌دهد اقلامی که در مجموعه T_2 قرار گرفته‌اند، در یک قفسه نیستند. محدودیت (۸) تضمین می‌کند برای زوج اقلامی که در مجموعه T_2 نیست، مقدار U_{ijst} برابر صفر است. محدودیت (۹) نشان می‌دهد برای اقلامی که در مجموعه T_1 قرار دارند، در صورتی که در قفسه‌های جداگانه باشند، مقدار عبارت V_{ijst} یک خواهد شد. محدودیت (۱۰) تضمین می‌کند برای اقلامی که در مجموعه T_1 نیستند، مقدار عبارت V_{ijst} صفر خواهد شد. محدودیت (۱۱) تضمین می‌کند در صورتی که دو قلم کالا در یک قفسه قرار گرفته باشند، با هم سازگار هستند ($\alpha_{ij} \geq \alpha$)، اما می‌توانند در صورت سازگار بودن در قفسه‌های جداگانه قرار بگیرند.

محدودیت (۱۲) نشان می‌دهد مجموع اقلامی که در زمان t از روی قفسه‌ها برداشته می‌شود، با میزان سفارش (تقاضای) آن قلم کالا برابر است. محدودیت (۱۳) نشان می‌دهد در صورتی که x_{ist} برابر صفر باشد، هیچ قلم کالایی روی s, l قرار نمی‌گیرد و اگر یک باشد، مقدار آن محدود خواهد بود. محدودیت (۱۴) نشان می‌دهد در صورتی که x'_{ist} برابر صفر باشد، هیچ قلم کالایی از روی s, l برداشته نمی‌شود و اگر یک باشد، مقدار آن محدود خواهد بود.

بر اساس محدودیت (۱۵)، اگر b_{ist} یک باشد، حتماً روی یک طبقه در آن قفسه واقع شده است. محدودیت (۱۶) نشان می‌دهد میزان هر قلم کالایی که روی یک طبقه قفسه‌ای چیده می‌شود، نباید از حداکثر ظرفیت آن قلم کالا بیشتر باشد. محدودیت (۱۷) تضمین می‌کند که در یک زمان، دو ربات در یک مکان قرار ندارند. بر اساس محدودیت (۱۸) نیز ربات در یک زمان فقط می‌تواند یک قفسه را حمل کند و به یک قفسه تخصیص می‌یابد.

$$b_{ist} \geq \frac{1}{h} \sum_{i=1}^h x_{ist}, \quad \forall i=1, \dots, n, \forall s=1, \dots, S, \forall t \quad (15)$$

$$y_{islt} \leq cap_i, \quad \forall i=1, \dots, n \quad (16)$$

$$y_{r dt} \cdot y_{r' dt} = 0, \quad \forall d, t, \forall r \neq r' \quad (17)$$

$$y_{rst} \cdot y_{rs't} = 0, \quad \forall r=1, \dots, R, \forall s=1, \dots, m \cdot w, \forall t=1, \dots, T \quad (18)$$

$$x_{ist}, x'_{ist} \in \{0, 1\}, \quad \forall i=1, \dots, n, \forall s=1, \dots, S, \forall l=1, \dots, h, \forall t \quad (19)$$

$$b_{ist} \in \{0, 1\}, \quad \forall i=1, \dots, n, \forall s=1, \dots, S, \forall l=1, \dots, h, \forall t \quad (20)$$

$$Z_{islt}, U_{islt}, V_{islt} \in \{0, 1\}, \quad \forall i=1, \dots, n, \forall s=1, \dots, S, \forall l=1, \dots, h, \forall t \quad (21)$$

$$y_{islt}, x'_{islt} \geq 0, \quad \forall i=1, \dots, n, \forall s=1, \dots, S, \forall l=1, \dots, h, \forall t \quad (22)$$

$$y_{r dt} \in \{0, 1\}, \quad \forall r=1, \dots, R, \forall d \in D, \forall t=1, \dots, T \quad (23)$$

قسمت اول تابع هدف اول، هزینه مسافت طی شده به وسیله همه قفسه‌ها را برای اقلام مختلف در زمان‌های مختلف به سمت ایستگاه دریافت اقلام با هم جمع می‌کند. قسمت دوم نیز هزینه مسافت طی شده به وسیله همه قفسه‌ها را برای اقلام مختلف در زمان‌های مختلف به سمت ایستگاه ارسال سفارش با یکدیگر جمع می‌کند. قسمت سوم، مجموع جریمه‌ای را برای اقلامی با $\alpha_{ij} \geq \alpha$ که در یک قفسه قرار ندارند و قسمت چهارم، تخفیفی را برای اقلام با $\alpha_{ij} \geq \alpha$ که در یک قفسه قرار دارند، در نظر می‌گیرد. تابع هدف دوم، مجموع قدم‌های طی شده به وسیله ربات‌ها را مینیمم می‌سازد. شایان ذکر است که با استفاده از ضرایب ε_1 و ε_2 که به ترتیب هزینه حمل قفسه و ربات برای یک متر مسافت طی شده را نشان می‌دهند- جملات توابع هدف، هم‌بعد (دیمانسیون) می‌شوند.

محدودیت (۱) تضمین می‌کند که مجموع تعداد طبقه‌های تخصیص داده شده به هر قلم کالا در هر زمان کوچک‌تر، مساوی مجموع کل طبقه‌های موجود در انبار است. در این روش، کمبود مجاز نیست؛ بنابراین، محدودیت (۲) بیان می‌کند که میزان سفارش هر قلم کالا در هر زمان باید از مجموع اقلام موجود کمتر باشد. محدودیت (۳)

جدول ۱. مجموعه اندیس ها، پارامترها و متغیرهای تصمیم

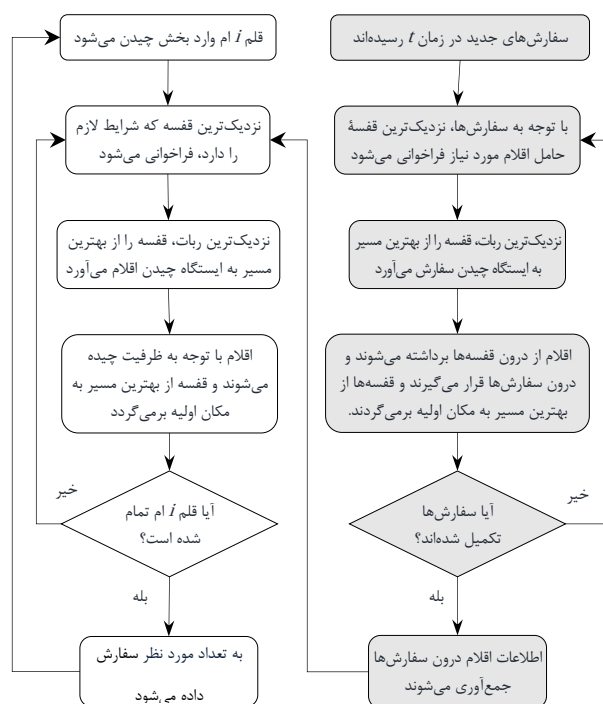
پارامترها		اندیس ها	
تعداد محصولات	N	اقلام	i, j
تعداد قفسه های عمودی (برای مثال، در شکل ۳ برابر ۶ است)	M	دوره زمانی	T
تعداد قفسه های افقی (برای مثال، در شکل ۳ برابر ۵ است)	W	طبقه های یک قفسه	L
تعداد طبقه های هر قفسه	H	شماره قفسه	S
دوره زمانی	T	شماره ربات	R
تعداد ربات های موجود	R	شماره مکان	D
متغیرهای تصمیم			
جریمه مورد نظر در صورتی که محصول i و ربات بیش از α در سفارش ها، در قفسه های جداگانه قرار بگیرند	P_2	اگر قلم i در زمان t در قفسه s باشد در غیر این صورت	$b_{ist} = \begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$
مکان های دریافت اقلام و سفارش ها	K	تعداد اقلام i که به محل s, l در زمان t تخصیص یافته اند	y_{ist}
ماتریس فاصله که d_{ist} فاصله s, l از مکان دریافت اقلام را در زمان t نشان می دهد	D_1	اگر قلم i از محل s, l در زمان t برداشته شود در غیر این صورت	$\begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} = x'_{ist}$
ماتریس فاصله که d_{ist} فاصله s, l از مکان ارسال سفارش ها را در زمان t نشان می دهد	D_2	اگر قلم i به محل s, l در زمان t تخصیص یابد یا وجود داشته باشد در غیر این صورت	$\begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases} = x_{ist}$
مجموعه زوج اقلام با $\alpha_j \geq \alpha$	T_1	تعداد اقلام i که از s, l در زمان t برداشته شده اند	y_{ist}
مجموعه زوج اقلام با $\alpha_j < \alpha$	T_2	اگر ربات r در زمان t به قفسه s تخصیص یابد	y_{rst}
درصد قرارگیری زوج اقلام در سفارش های گذشته	U	اگر قلم i در زمان t در قفسه s باشد، اما قلم j نباشد و $\alpha_j < \alpha$	U_{ijt}
ماتریس جریان که f_{it} میزان ورود کالای i را در زمان t نشان می دهد	F	اگر قلم i و j در زمان t در قفسه s باشند و $\alpha_j \geq \alpha$	Z_{ijt}
مقاری بین صفر تا یک که مقیاس قرارگیری اقلام در مجموعه های T_1 و T_2 است	α	اگر قلم i در زمان t در قفسه s باشد و $\alpha_j \geq \alpha$	V_{ijt}
ماتریس سفارش که O_{it} میزان تقاضای کالای i را در زمان t نشان می دهد	O	در غیر این صورت	$\begin{cases} 1 \\ 0 \end{cases}$
هزینه حمل قفسه و ربات برای یک متر مسافت طی شده	e_1, e_2	پارامترها	
تعداد طبقه های اختصاص یافته به قلم i در زمان t	q_{it}	مجموعه نقاطی که هر ربات قادر است با توجه به مواقع از آن عبور کند	J
حداکثر تعداد واحدهای قابل بارگیری قلم i در یک طبقه	cap_i	مجموعه نقاطی که ربات r طی می کند و از آن انتخاب می شود	$S(r)$
نسبت سفارش قلم i و j به کل سفارش ها	α_{ij}	مجموعه نقاطی که ربات ها قادرند از روی آن عبور کنند	D
طبقه i از قفسه s و j از قفسه t	(s, t)	یک ماتریس $N \times N$ که در آن C_{ij} برابر یک است، اگر محصول i با محصول j سازگار باشند در غیر این صورت صفر	C
مکان قفسه s در زمان t	(x_{st}, y_{st})	تخفیف، اگر محصول i و ربات بیش از α در سفارش ها در یک قفسه قرار بگیرند	P_1
مکان ربات r در زمان t	(x_{rt}, y_{rt})		
هزینه خرید هر ربات	CR		

نتایج محاسباتی

در این تحقیق، مسائل تخصیص و ذخیره‌سازی اقلام درون قفسه‌ها، تخصیص ربات‌ها به قفسه‌ها و مسیریابی ربات‌ها با یکدیگر تلفیق شده‌اند و سیستم بهینه‌ای برای انبار و مدیریت آن ایجاد شده است. برنامه‌ریزی حرکت ربات در مسیرهای خاص انجام می‌شود و سورینک [۱۹] این مسئله را جزء مسائل NP-hard طبقه‌بندی می‌کند. مسئله تخصیص قفسه‌ها به ربات‌ها، جزء مسائل «ربات‌های تک‌کار- کارهای تک‌ربات- تخصیص گسترده زمانی»^۹ است و این‌ها هم در حیطه مسائل NP-hard هستند [۲۰]؛ بنابراین، به‌منظور حل مسئله لازم است از روش‌های ابتکاری و فراابتکاری استفاده شود. برای حل مسئله از نرم‌افزار متلب استفاده شد. به‌منظور حل مسئله تخصیص اقلام به قفسه‌ها نیز الگوریتم ژنتیک و برای مسئله مسیریابی ربات‌ها در صورت اندک‌بودن تعداد ربات‌ها، جست‌وجوی همسایگی‌ها، چک‌کردن تداخل آن‌ها و یافتن مسیر بهینه به کار گرفته شد، اما در صورت زیادبودن تعداد

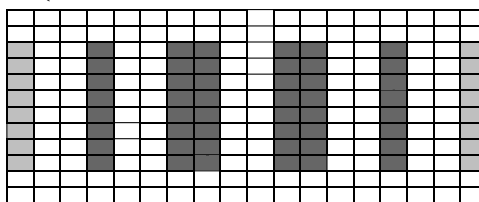
ربات‌ها می‌توان از روشی که در مقاله یو و لاوال بیان شده، استفاده کرد. در شکل ۸، نمودار ارتباط میان مسئله مسیریابی و چیدن اقلام مشاهده می‌شود.

برای حل مسئله مسیریابی در ابعاد کوچک، الگوریتم از نقطه مبدأ آغاز می‌شود و نزدیک‌ترین گره بعدی به خود را می‌یابد. همین عمل را آن‌قدر تکرار می‌کند تا به نقطه مقصد برسد، اما برای مسئله با ابعاد بزرگ و تعداد ربات‌های بیشتر، گرافی از نقاط موجود برای عبور ربات‌ها تهیه و نقاط مبدأ و مقصد نیز برای هریک مشخص می‌شود. حال شبکه آن‌قدر تکرار می‌شود تا با حل مسئله ماکزیمم جریان برای شبکه مزبور، کوتاه‌ترین مسیر برای حرکت هر ربات بدون برخورد حاصل شود [۱۸]. در شکل ۹ نحوه شماره‌گذاری مسیرهای مجاز آمده است. در این روش، هریک از نقاط با دو عدد مشخص می‌شوند که عدد اول نشان‌دهنده طول و عدد دوم نشانگر عرض نقطه است. مجموعه نقاطی که ربات‌ها از آن‌ها عبور می‌کنند، در شکل ۸ مشاهده می‌شود.



شکل ۸. نمودار مسئله مسیریابی و چیدن اقلام

$$D = \{(1,1), (2,1), \dots, (17,1), (2,2), \dots, (17,11)\}$$



شکل ۹. نحوه شماره گذاری مسیرهای قابل عبور

در این جدول، برخی از ابعاد یک کروموزوم نشان داده شده است؛ برای مثال، عدد ۵ به این معناست که از کالای اول در زمان $t=1$ ، ۵ عدد در طبقه اول قفسه اول وجود دارد.

تعداد کروموزوم‌ها بعد از اجرای مختلف برنامه، ۱۰۰ در نظر گرفته شده است. همچنین تعداد تکرارها ۵۰۰، نرخ جهش ۰/۰۱، نرخ انتخاب ۷۰ درصد و انتخاب والدین تصادفی است. همچنین ادغام والد‌ها برای تولید نسل بعدی، با یک نقطه تصادفی انجام می‌شود. در جدول ۳، دو کروموزوم بالا والد‌ها و نقطه انتخاب شده تصادفی ۳ است. همچنین دو فرزند ایجاد شده در پایین جدول نشان داده شده‌اند. پارامترهای مسئله و همچنین نتایج اجرای برنامه در ادامه ارائه شده است.

$$m = 4, w = 6, h = 3, 4, 5, cap = 100, \varepsilon_1 = 40,$$

$$p_1 = 10, p_2 = 100, N = 10, 20, 50, 70, 100, \varepsilon_2 = 100,$$

$$T = 10, R = 4, 6, 8, 10, CR = 1000000$$

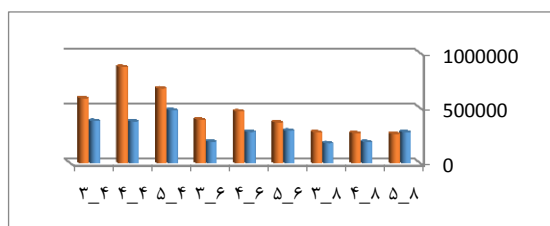
اولین مسئله مهم در استفاده از الگوریتم ژنتیک، انتخاب کروموزوم‌های مناسب است. کروموزوم‌ها براساس دو متغیر اصلی y_{islt} و y'_{islt} انتخاب شده‌اند. مقدار متغیرهای صفر و یک x_{islt} و x'_{islt} براساس مقادیر y_{islt} و y'_{islt} تعیین می‌شود؛ به طوری که اگر متغیرهای y_{islt} و y'_{islt} بزرگتر از صفر باشند، متغیرهای x_{islt} و x'_{islt} معادل آن‌ها مقدار یک و در غیر اینصورت مقدار صفر اختیار می‌کنند. کروموزوم‌های y_{islt} و y'_{islt} چهاربعدی‌اند. برای نشان دادن کروموزوم‌های بیش از دو بعد باید بقیه ابعاد ثابت باشند و دو بعد دیگر نمایش داده شوند. فرض کنید برای یک مسئله خاص با ۳ قلم کالا $T=3$ ، $S=3$ و $l=4$ است. کروموزوم‌ها را می‌توان با ثابت نگه داشتن دو بعد انتخابی و متغیر بودن دو بعد دیگر، به شکل جدول ۲ نشان داد.

جدول ۲. نمایش کروموزوم‌ها

$i = 1, t = 1$				
	$l = 1$	$l = 2$	$l = 3$	$l = 4$
$S = 1$	۵	۰	۰	۰
$S = 2$	۰	۱۴	۰	۱۲
$S = 3$	۰	۰	۰	۰

جدول ۳. ادغام والد‌ها برای تولید نسل جدید

	والد اول					والد دوم			
	$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$		$l=1$	$l=2$	$l=3$	$l=4$
$S=1$	۵	۰	۰	۰		۰	۸	۰	۱۲
$S=2$	۰	۱۴	۰	۱۲			۰	۰	۰
$S=3$	۰	۰	۰	۰		۰	۰	۱۰	۰
فرزند اول					فرزند دوم				
$S=1$	۵	۰	۰	۱۲		۰	۸	۰	۰
$S=2$	۰	۱۴	۰	۰		۷	۰	۰	۱۲
$S=3$	۰	۰	۰	۰		۰	۰	۱۰	۰



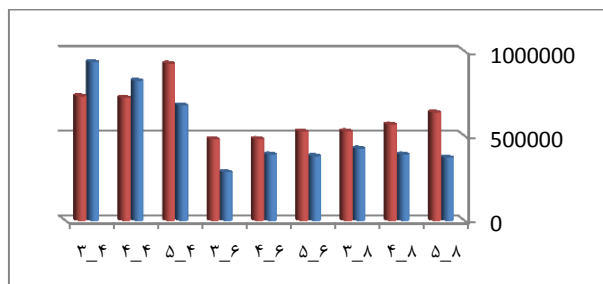
شکل ۱۰. هزینه حالت‌های مختلف ربات‌ها و قفسه‌ها در مسائل با ۱۰ و ۲۰ قلم کالا

شکل ۱۱ مربوط به هزینه‌های دو مسئله آبی ($N=50$) و قرمز ($N=70$) است. برای مسئله $N=50$ بهترین حالت، ۶ ربات و قفسه‌های ۴ طبقه است. برای مسئله $N=70$ نیز بهترین حالت ۶ ربات و قفسه‌های ۳ طبقه است.

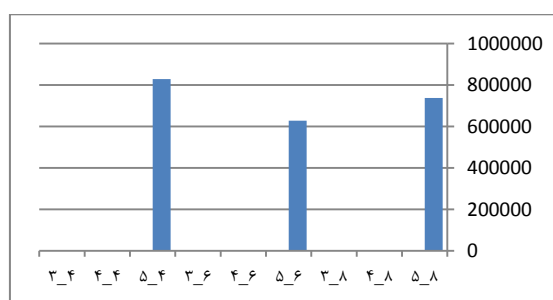
همان‌طور که از نتایج محاسباتی در جدول ۴ مشخص است، با افزایش تعداد ربات‌ها برای هر مسئله، هزینه‌ها افزایش می‌یابد. اگر محدودیت سرمایه را نیز به محدودیت‌های مسئله اضافه کنیم، با توجه به سرمایه در دسترس می‌توان تعداد ربات‌های بهینه را با توجه به هزینه‌ها و همچنین سرمایه در دسترس به دست آورد. صرف‌نظر از قیمت ربات‌ها و هزینه‌ای که بابت آن سرمایه‌گذاری می‌شود، می‌توان هزینه هریک از حالت‌های فوق را برای هر مسئله به دست آورد که نمودار هزینه در هر حالت برای هریک از مسائل مطابق شکل ۱۰ است. در شکل اول، هزینه‌ها بدون در نظر گرفتن هزینه ربات‌ها برای دو مسئله اول یعنی $N=10$ (آبی) و $N=20$ (قرمز) است. برای مسئله اول، ۸ ربات و ۳ طبقه و برای مسئله دوم، ۸ ربات و ۵ طبقه مناسب است.

جدول ۴. نتایج محاسبات

$h = 5$		$h = 4$		$h = 3$		N	
زمان	هزینه	زمان	هزینه	زمان	هزینه		
۲۸/۹	۴,۴۸۳,۷۹۲	۱۶,۷	۴,۳۸۲,۷۳۷	۱۵/۴	۴,۳۸۵,۲۷۱	۱۰	$R=4$
۳۷/۵	۴,۶۸۱,۷۲۳	۲۴,۳	۴,۸۷۶,۳۷۲	۲۴/۷	۴,۵۹۱,۷۲۸	۲۰	
۸۵/۶	۴,۶۸۲,۶۳۲	۸۹,۳	۴,۸۲۷,۳۷۲	۶۷/۳	۴۹,۳۷,۴۳۶	۵۰	
۹۲/۵	۴,۹۲۸,۶۲۵	۹۱,۲	۴,۷۲۶,۳۸۲	۷۱/۴	۴,۷۳۶,۲۷۷	۷۰	
۹۷/۸	۵,۸۲۸,۸۳۲	—	—	—	—	۱۰۰	
۱۹/۴	۶,۲۹۷,۳۶۲	۱۶/۴	۶,۲۸۷,۳۹۲	۱۴/۳	۶,۱۹۸,۳۶۲	۱۰	$R=6$
۲۶/۸	۶,۳۷۲,۶۷۲	۲۳/۵	۶,۴۷۲,۶۸۲	۱۸/۷	۶,۳۹۷,۲۶۲	۲۰	
۷۸/۴	۶,۳۸۲,۶۳۸	۶۳/۲	۶,۳۹۲,۸۷۳	۶۵/۴	۶,۲۸۷,۳۸۳	۵۰	
۸۹/۳	۶,۵۲۸,۳۶۸	۸۲/۷	۶,۴۸۳,۷۹۲	۷۸/۳	۶,۴۸۲,۹۲۲	۷۰	
۹۳/۷	۶,۶۲۸,۲۶۸	—	—	—	—	۱۰۰	
۱۶/۹	۸,۲۸۳,۷۹۲	۱۶/۳	۸,۱۹۳,۷۷۱	۱۵/۷	۸,۱۸۳,۲۶۲	۱۰	$R=8$
۳۰/۴	۸,۲۶۸,۳۶۹	۲۹/۴	۸,۲۷۳,۹۳۷	۲۸/۴	۸,۲۸۲,۳۷۸	۲۰	
۷۵/۲	۸,۳۷۲,۹۳۷	۷۳/۲	۸,۳۹۲,۷۳۲	۶۷/۲	۸,۴۲۷,۳۶۵	۵۰	
۸۹/۴	۸,۶۳۹,۷۴۳	۸۴/۶	۸,۵۶۹,۳۷۳	۷۵/۸	۸,۵۲۹,۷۳۳	۷۰	
۹۷/۴	۸,۷۳۷,۶۴۳	—	—	—	—	۱۰۰	



شکل ۱۱. هزینه حالت های مختلف ربات ها و قفسه ها برای مسائل با ۵۰ و ۷۰ قلم کالا



شکل ۱۲. هزینه حالات مختلف ربات ها و قفسه ها برای مسائل با ۱۰۰ قلم کالا

به آن اطلاق شد که با الگوبرداری از حرکت خودکار قفسه های اقالام به سمت اپراتور به وسیله ربات (شکل ۱۳) در جهت معکوس حرکت سنتی جمع آوری اقالام به وسیله اپراتور است.

در ادامه، به دو زیرمسئله مسیریابی ربات ها و ذخیره سازی (چینش) بهینه اقالام در ساما پرداخته شد و مدل ریاضی این دو زیرمسئله ارائه شد. ویژگی این مدل ریاضی در مقایسه با مدل های موجود، توجه به مسیر حرکت ربات ها بر مسیرهای مشخص و لحاظ کردن درصد اقالام سفارش داده شده با هم در نحوه چیندن اقالام در قفسه ها و همچنین تکمیل سفارش هاست. با توجه به NP-hard بودن مدل ریاضی، روش الگوریتم ژنتیک برای حل آن ارائه شد و نتایج، گزارش و تحلیل شدند.

به منظور ادامه کار و گسترش این مسئله می توان بحث نحوه تخصیص سفارش ها به اپراتورها را برای تکمیل به مدل بالا اضافه کرد؛ به طوری که سفارش ها با توجه به تشابهات موجود در اقالام درخواستی دسته بندی شوند و برای تکمیل، به اپراتورها اختصاص یابند.

شکل ۱۲ مربوط به هزینه های $N=100$ است که در آن، کمترین هزینه به ۶ ربات و قفسه های ۵ طبقه اختصاص دارد. همان طور که در جدول ۴ و شکل ۱۲ مشاهده می شود، از آنجاکه تعداد اقالام ۱۰۰ است و براساس فرضیات مسئله، تعداد طبقات در انبار باید بزرگ تر یا مساوی تعداد اقالام باشد، این مسئله فقط برای قفسه های ۵ طبقه قابل حل است.

نتیجه گیری و پژوهش های آتی

در این مقاله، شیوه نوین انبارداری به نام Kiva Systems که در سال های اخیر به صورت تجاری و گسترده در شرکت Amazon به کار رفته است، بررسی و چهار زیرمسئله اصلی مهندسی آن و نیز ارتباط این زیرمسائل با یکدیگر شناسایی شد.

از آنجاکه سیستم انبارداری مورد مطالعه، ویژگی های جدید و منحصر به فردی دارد که آن را از انبارهای اتوماتیک با حرکت اقالام به وسیله لیفتراک و AGV و نوار نقاله متمایز می سازد، نام «سیستم انبارداری معکوس اتوماتیک (ساما)»



شکل ۱۳. نمایی از به کارگیری سیستم Kiva در شرکت آمازون [۱۹]

مراجع

1. Wurman, P.R., D'Andrea, R. and Mountz, M. (2008). "Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses", *AI Magazine*, Vol. 29, No. 1, PP. 9–20.
2. Lesser, V.R. (1999). "Cooperative multiagent systems: A personal view of the state of the art", *IEEE Transactions on Knowledge and Data Engineering*, Vol. 11, No. 1, PP. 133–142.
3. De Koster, R., Le-Duc, T. and Roodbergen, K.J. (2007). "Design and control of warehouse order picking: A literature review", *European Journal of Operational Research*, Vol. 182, No. 2, PP. 481–501.
4. Wurman, P.R., D'Andrea, R. and Mountz, M. (2008). "Coordinating hundreds of cooperative, autonomous vehicles in warehouses", *AI Magazine*, Vol. 29, No. 1, PP. 9–20.
5. Guerriero, F., Musmanno, R., Pisacane, O. and Rende, F. (2013). "A mathematical model for the multi-levels product allocation problem in a warehouse with compatibility constraints", *Applied Mathematical Modeling*, Vol. 37, No. 6, PP. 4385–4398.
6. Muppani, V.R. and Adil G.K. (2006). "Formation of storage classes in the presence of space cost for warehouse planning", *International Journal of Services Operations and Informatics*, Vol. 1, No. 3, PP. 286–303.
7. Heragu, S.S. (2005). "Mathematical model for warehouse design and product allocation", *Int. J. Production Research*, Vol. 43, No. 2, PP. 327–338.
8. Öñüt, S., Tuzkaya, U.R. and Doga B. (2008). "A particle swarm optimization algorithm for the multiple-level warehouse layout design problem", *Computers and Industrial Engineering*, Vol. 54, No. 4, PP. 783–799.
9. Sanei, O., Nasiri, V., Marjani, M.R. and Moattar-Husseini, S.M. (2011). "A heuristic algorithm for the warehouse space assignment problem considering operational constraints: with application in a case study", *Proc. 2011 Int. Conf. on Industrial Engineering and Operations Management*, Kuala Lumpur, Malaysia, January 22–24.
10. Bektas, T. (2006). "The multiple traveling salesman problem: an overview of formulations and solution procedures", *Omega*, Vol. 34, No. 3, PP. 209–219.
11. Theys, C., Broysy, O., Dullaert, W., Raa. (2010). "Using a TSP heuristic for routing order pickers in warehouses", *European Journal of Operational Research*, PP. 755–763.
12. Norouzi, N., et al. (2015). "New mathematical modeling for a facilities location and vehicle routing problem solving by a hybrid imperialist competitive algorithm", *Journal of Industrial Engineering*, vol 49, No 1, PP. 129–137.

13. Parragh, S., Doerner, K. and Hart, R. (2008). "A survey on pickup and delivery problems: Part I, Transportation between customers and depot", *Journal für Betriebswirtschaft*, Vol. 58, No. 1, PP. 21–51.
14. Pandelis, D.G., Karamatsoukis, C. and Kyriakidis, G. (2013). "Single vehicle routing problems with a predefined customer order, unified load and stochastic discrete demands", *Probability in the Engineering and Informational Sciences*, Vol. 27, No. 1, PP. 1–23.
15. Setak, M., Jalili Bolhassani, S., Karimi, H. and Gorbani, B. (2014). "A node-based mathematical model towards the location routing problem with intermediate replenishment facilities under capacity constraint", *International Journal of Engineering*, Vol. 27, No. 6, PP. 911–20.
16. Davoodi, M., Abedin, M., Banyassady, B., Khanteimouri, P. and Mohades A. (2013). "An optimal algorithm for two robots path planning problem on the grid", *Robotics and Autonomous Systems*, Vol. 61, No. 12, PP. 1406–1414.
17. Roozbehani, H. and D'Andrea R. (2011). "Adaptive highways on a grid", In Pradalier, C., Siegwart, R., and Hirzinger, G. (Eds.), *Robotics Research*, Vol. 70. Springer Berlin/Heidelberg, PP. 661–680.
18. Yu, J. and LaValle, S.M. (2013). "Planning optimal paths for multiple robots on graphs", *Proc. IEEE Int. Conf. on Robotics and Automation (ICRA)*, May 2013, Kalsruhe, Germany, PP. 3612–3617.
19. Surynek, P. (2010). "An optimization variant of multi-robot path planning is intractable", *Proc. of the 24th AAAI Conference on Artificial Intelligence*, PP. 1261–1263.
20. Bruno, J., Coffmann, E. and Sethi, R. (1974). "Scheduling independent tasks to reduce mean finishing time", *Communications of ACM*, Vol. 17, No. 7, PP. 382–387.
21. Parekh, A. (2016). "Kiva Systems–Robotic Warehouse", Available online at <http://hackedgadgets.com/2010/07/10/kiva-systems-robotic-warehouse>.

واژه‌های لاتین به ترتیب استفاده در متن

1. AS/RS
2. RFID
3. class-based
4. MRS
5. setup
6. SLAP
7. PAP
8. Vehicle Routing Problem with Backhauls (VRPB)
9. ST-SR-TA